

2.2.9 Elektromagnetisches Spektrum; Erzeugung, Nachweis und technische Anwendung elektromagnetischer Strahlung; Bragg-Beziehung

Überblick über das elektromagnetische Spektrum

Die Lichtwellen sind nur ein kleiner Ausschnitt aus dem viel umfassenderen Gebiet der elektromagnetischen Wellen, über die die nachfolgende Aufstellung eine Übersicht gibt:

Frequenz in Hz	Länge in m	Bezeichnung	Erzeugung	Nachweis, Verwendung	Auftreten, Verwendung
$3 \cdot 10^1$	10^7	Wechselströme	Generator	Messgerät	Wechselstrom
$3 \cdot 10^2$ $3 \cdot 10^3$	10^5 10^4	tonfrequente Wechselströme	elektrische Schwingkreise	Lautsprecher	Übertragung von Musik
$3 \cdot 10^4$ $3 \cdot 10^5$ $3 \cdot 10^6$ $3 \cdot 10^7$ $3 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^9$ $3 \cdot 10^{10}$ $3 \cdot 10^{11}$ $3 \cdot 10^{12}$	10^4 10^3 10^2 10^1 10^0 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4}	LMKU-Wellen, Mikrowellen	Röhrengenerator, Klystron	abgestimmte Empfänger	Rundfunk, Fernsehen, Radar, Satellitensignale
$3 \cdot 10^{13}$ $3 \cdot 10^{14}$ $3 \cdot 10^{15}$ $3 \cdot 10^{16}$	10^{-5} 10^{-6} 10^{-7} 10^{-8}	Infrarot, sichtbares Licht, UV-Strahlung	Übergänge in äußeren Atomschalen	Thermosäule, Auge, Fotozellen	Wärme, Lampen, Quarzlampen
$3 \cdot 10^{17}$ $3 \cdot 10^{18}$ $3 \cdot 10^{19}$ $3 \cdot 10^{20}$ $3 \cdot 10^{21}$	10^{-9} 10^{-10} 10^{-11} 10^{-12} 10^{-13}	Röntgenstrahlung	Übergänge in inneren Atomschalen (Röntgenröhren)	Fotoplatten, Ionisation	Röntgengeräte
$3 \cdot 10^{22}$ $3 \cdot 10^{23}$ $3 \cdot 10^{24}$	10^{-14} 10^{-15} 10^{-16}	γ -Strahlung, Höhenstrahlung	Kernprozesse	Fotoplatten, Ionisation	radioaktiver Zerfall

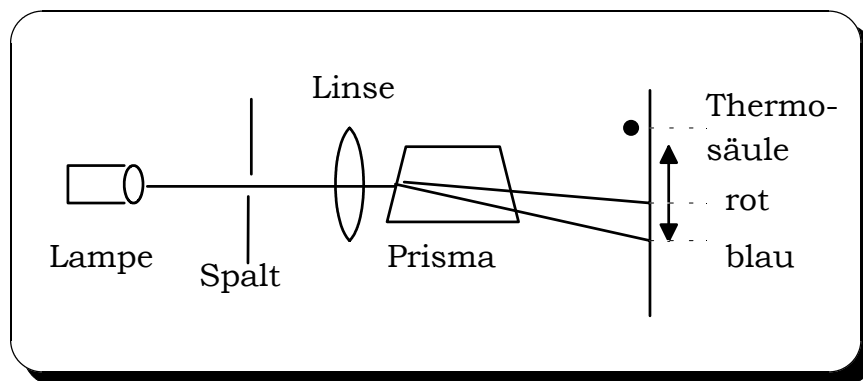
Elektromagnetische Wellen entstehen, wenn elektrische Ladungen beschleunigt werden. Dies kann auf unterschiedliche Weise geschehen; entsprechend teilt man die elektromagnetische Strahlung ein. Sie unterscheiden sich

neben der Art der Entstehung und des Nachweises lediglich durch die Frequenz und damit auch durch ihre Vakuumwellenlänge.

Infrarot

Es ist nicht anzunehmen, dass alle Lichtquellen nur elektromagnetische Wellen aussenden, die genau in dem für den Menschen sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen etwa 400 nm und 800 nm liegen. Mit den folgenden Versuchen sollen die Nachbarbereiche des sichtbaren Spektrums untersucht werden.

Versuch 1:



Das Licht einer Kohlebogenlampe, die ein kontinuierliches Spektrum liefert, wird mit einem Geradsichtprisma spektral zerlegt. Die entstehende Strahlung wird mit einer Thermosäule untersucht.

Ergebnis: Die Thermosäule zeigt bei der Bewegung von blau nach rot eine zunehmende Thermospannung. Diese steigt sogar zunächst noch weiter, wenn die Säule über den roten Rand hinaus bewegt wird (Infrarot), und fällt dann rasch ab.

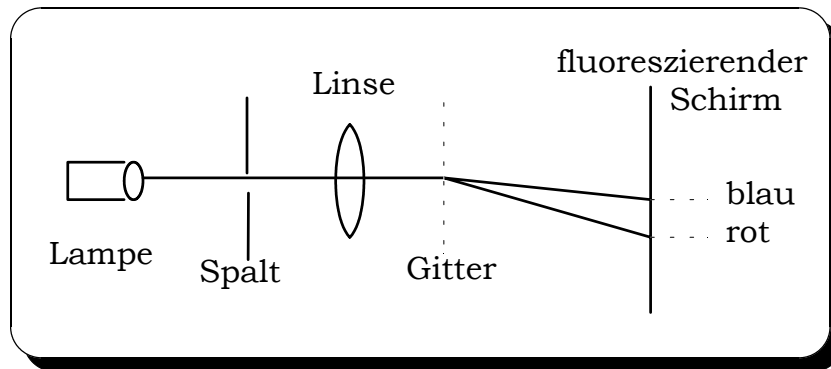
Anmerkungen:

1. Beim Gitterspektrum wird rotes Licht am stärksten, blaues am wenigsten abgelenkt. Beim Prismenspektrum ist dies genau umgekehrt; mögliche Überlagerungen der Spektren verschiedener Ordnungen stören hier also nicht!
2. Die Thermosäule besteht aus hintereinander geschalteten Thermoelementen, deren Thermospannung bei verschiedenen Kontaktstellen-temperaturen noch verstärkt wird.
3. Der größte Teil der von einer Glühlampe ausgesandten Energie fällt in das infrarote Gebiet.

Ultraviolett

Auch über das kurzwellige, violette Ende des Spektrums hinaus lässt sich zu noch kürzeren Wellenlängen hin Strahlung nachweisen:

Versuch:



Das Licht einer Quecksilberdampf Lampe wird mit einem Gitter spektral aufgefächert und mit einem fluoreszierenden Schirm aufgefangen.

Ergebnis: Der Schirm leuchtet auch jenseits der violetten Linie auf, registriert also Strahlung (Ultraviolett).

Anmerkungen:

1. Die fluoreszierende ZnS-Schicht wirkt als "Frequenzwandler"; das Licht mit kürzerer Wellenlänge als Violett wird in grünes Fluoreszenzlicht umgewandelt. Das langwelligere rote Licht ruft dagegen keine Fluoreszenzen hervor.
2. Statt des ZnS-Schirms kann man auch frisch gewaschene Wäsche verwenden; die "Weißmacher" in Waschmitteln rufen nämlich ebenfalls Fluoreszenzen hervor.
3. Im Versuch wird ein Gitterspektrometer verwendet, um das UV-Licht weniger abzulenken als den sichtbaren Bereich (vgl. Versuch 1!).

Die Sonne strahlt neben sichtbarem Licht auch Infrarot und Ultraviolett auf die Erde. Der langwellige Anteil der Infrarotstrahlung wird vom in der Luft enthaltenen Wasser unmittelbar absorbiert. Die UV-Strahlung bewirkt die Pigmentierung der Haut, tötet Bakterien und fördert die Bildung des antirachitischen Vitamins D. Die UV-Strahlung wird von Staub u. ä. absorbiert; sie ist daher in größeren Höhen intensiver als im Flachland.

Zusammenfassung: Ultraviolette Strahlen zeigen an einem Gitter Beugung und Interferenz.

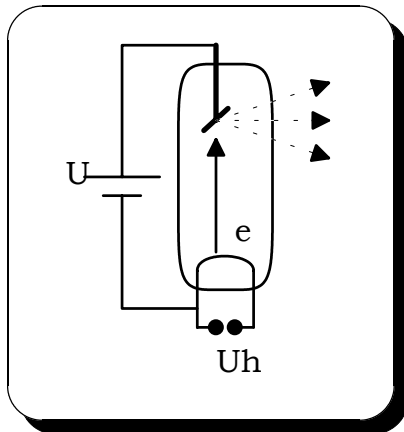
Röntgenstrahlen

Röntgenstrahlen entstehen, wenn schnell bewegte Elektronen auf ein Hindernis treffen. Sie wurden 1895 von W. C. Röntgen (1845 -1923) entdeckt.

Versuch:

In Glühkathodenröhren werden thermisch von der Kathode abgelöste Elektronen durch hohe Spannung (bis 500 kV) zur Anode hin stark beschleunigt, so dass sie dort mit großer kinetischer Energie auftreffen.

Skizze einer Röntgenröhre:



Dabei kann es zu drei verschiedenen Vorgängen kommen:

1. Die Elektronen verlieren ihre Energie beim Eindringen in die Anode und bewirken eine Erwärmung der Anode. Das gilt für etwa 99 % aller Elektronen.
2. Die Elektronen werden beim Durchgang durch einzelne Atome des Anodenmaterials ganz oder teilweise abgebremst und geben ihre Energie als Röntgenbremsstrahlung ab.
3. Die Elektronen bringen die Atome des Anodenmaterials in einen angeregten Zustand. Die angeregten Atome gehen unter Aussendung einer für das Anodenmaterial charakteristischen Strahlung, die zu einem Linienspektrum führt, wieder in den Grundzustand über.

Der Nachweis der Röntgenstrahlung ergibt sich aus ihren Eigenschaften:

1. Röntgenstrahlen besitzen ein erhebliches Durchdringungsvermögen für alle Materie. Daraus ergeben sich etwa die bekannten Anwendung in der Medizin, der Materialprüftechnik u. ä.
2. Röntgenstrahlen vermögen viele Stoffe zu Fluoreszenz bzw. Phosphoreszenz anzuregen.
3. Röntgenstrahlen schwärzen fotografische Platten.
4. Röntgenstrahlen ionisieren Gase.
5. Röntgenstrahlen zeigen Interferenzen bei der Reflexion und beim Durchgang durch Kristalle.

Setzt man Röntgenstrahlen elektrischen oder magnetischen Feldern aus, so werden sie dadurch nicht beeinflusst; Röntgenstrahlen sind also keine Ströme geladener Teilchen.

Die Kristallgitterinterferenzen waren der entscheidende Nachweis für den Wellencharakter der Röntgenstrahlen. Heute weiß man, dass die Wellenlänge der Röntgenstrahlen viel zu klein ist, als dass man mit optischen Gittern Interferenzen deutlich beobachten könnte, wengleich man durch extrem streifenden Einfall auf ein optisches Gitter (= stark verkleinerte wirksame Gitterkonstante!) ab 1925 durch Interferenz Wellenlängen um 1 nm und darunter mit großer Genauigkeit bestimmen konnte.

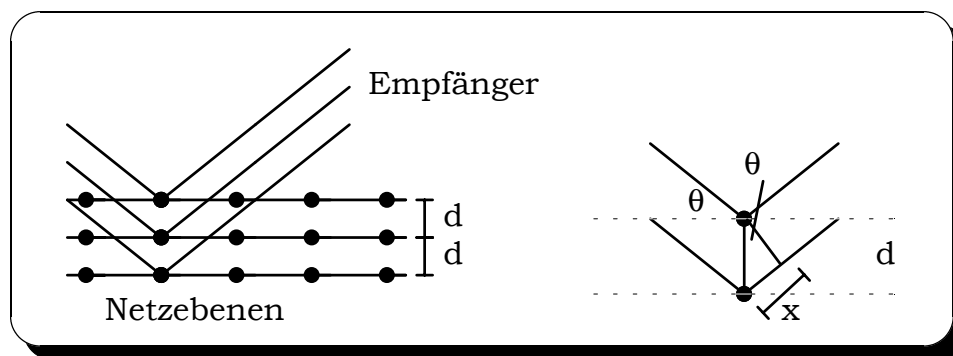
Viel feinere Gitter hält die Natur in den Kristallen bereit. Die einen Kristall aufbauenden Partikel bilden Raumgitter. Fällt Röntgenstrahlung auf ein solches Gitter, so treten Interferenzen auf, da die Wellenstrahlung an den räumlich regelmäßig angeordneten Partikeln des Kristalls eine kohärente Streustrahlung auslöst.

Merkliche Intensitäten der Streustrahlung treten nur in den Beobachtungsrichtungen auf, für die alle gestreuten Wellen konstruktiv interferieren, d. h. für die Gangunterschiede ganzzahlige Vielfache der Wellenlänge sind. Liegen im einfachsten Fall alle streuenden Atome ungeordnet in einer Ebene, so lässt sich Reflexion nach dem Reflexionsgesetz bei beliebigen Einfallswinkeln beobachten. Diese lässt sich als Interferenz deuten.

Zusammenfassung: Eine einzelne mit Streuzentren besetzte Ebene wirkt bei jedem Einfallswinkel wie ein Spiegel.

Die Interferenzerscheinung an einem mehrdimensionalen Gitter unterscheidet sich von den Interferenzen am Strichgitter dadurch, dass von einem Raumgitter nur eine ganz bestimmte Wellenlänge zu einem Intensitätsmaximum gebeugt wird, wenn die Strahlung unter einem festen Winkel auf den Kristall trifft. Max von Laue (1879- 1960) konnte dieses Ergebnis mit der Wellentheorie quantitativ deuten. Eine anschauliche Darstellung desselben Sachverhalts gelang W. H. Bragg (1862 -1942) und W. L. Bragg (1890 - 1971).

Im einfachsten Fall sind die Partikeln im Kristall in Netzebenen mit dem Abstand d zusammengefasst (vgl. Skizzen).



Nach Bragg interpretiert man das Ergebnis der Streustrahlinterferenz als regelmäßige Reflexion der einfallenden Röntgenstrahlung an den Kristallpartikeln. Die an benachbarten Netzebenen "reflektierten" Strahlen interferieren miteinander mit dem Gangunterschied

$$\Delta s = 2 \cdot x,$$

wobei x im skizzierten rechtwinkligen Dreieck aus

$$\frac{x}{d} = \sin \theta$$

berechnet werden kann. Für Δs gilt dann

$$\Delta s = 2 \cdot d \cdot \sin \theta.$$

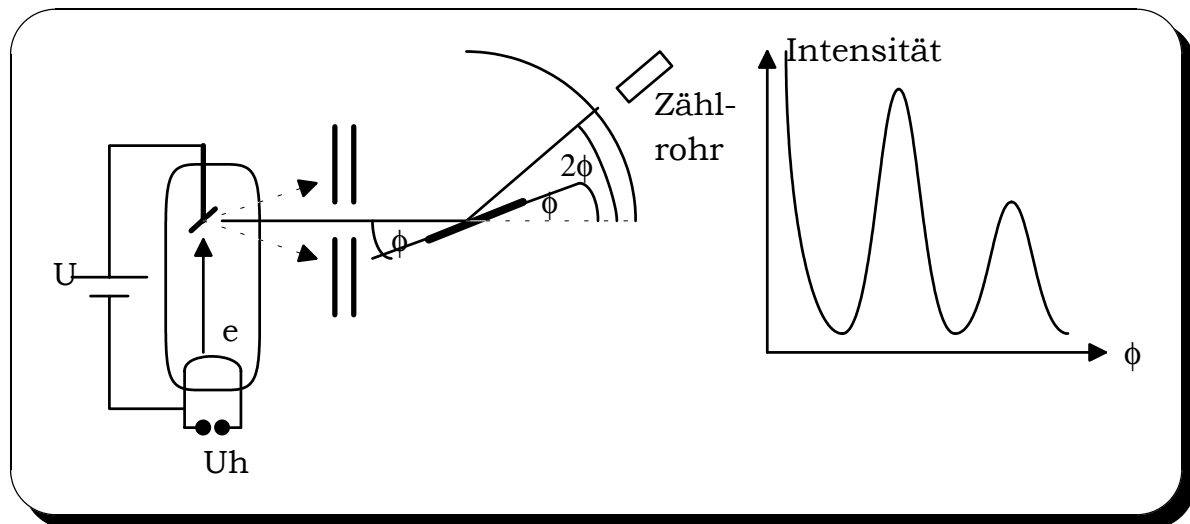
Natürlich muss für konstruktive Interferenz der Gangunterschied ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge sein, so dass als Bedingung für den sog. Glanzwinkel, unter dem bei einer bestimmten Wellenlänge ein Interferenzmaximum erscheint, gilt:

$$k \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta.$$

Zusammenfassung: Zwei oder mehr parallel streuende Ebenen im Abstand d interferieren konstruktiv, wenn die Bragg-Bedingung gilt: $k \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta$. Dabei ist θ der Winkel zwischen Einfallrichtung und Netzebene.

Mit der sog. Drehkristallmethode lässt sich unter Zuhilfenahme der Bragg-schen Beziehung die Wellenlänge λ einer Röntgenstrahlung berechnen.

Versuch:



Ein dünner Röntgenstrahl fällt unter dem variablen Winkel θ auf einen Einkristall. Die Intensität des reflektierten Strahls wird mit dem Geiger-Müller-Zählrohr ermittelt, das gegenüber dem einfallenden Röntgenstrahl den Winkel $2 \cdot \theta$ hat.

Ergebnis: Es zeigen sich die erwarteten Maxima, aus denen nach obiger Gleichung bei bekanntem Netzebenenabstand die Wellenlänge λ berechnen lässt.

Die Bragg-Reflexion lässt sich im Modellversuch mit Mikrowellen und einem geeigneten zweidimensionalen Gitter durchführen:

Versuch: Im analogen Modellversuch werden anstelle von Röntgenstrahlen Mikrowellen, anstelle eines Kristallgitters ein zweidimensionales Gitter aus Metallstäben verwendet.

Ergebnis: Nur bei bestimmten Richtungen der einfallenden Strahlung findet man deutliche Reflexionsmaxima, und zwar jeweils nur ein Maximum.

Dieses tritt in Richtung der regulären Reflexion auf.